

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240331003

电子舌结合气相色谱-质谱法分析评价不同 莲蓉馅料风味差异

杨文安¹, 张楠², 郭伟雄¹, 梁梓健², 李生花¹, 谢雅曼², 高向阳², 王和德^{1*}

(1. 广州酒家集团利口福食品有限公司, 广州 511442;

2. 华南农业大学食品学院广东省功能食品活性物重点实验室, 广州 510642)

摘 要: **目的** 利用电子舌和气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术检测纯白莲蓉、纯红莲蓉、大师手工纯白莲蓉、低糖纯白莲蓉和绿色食品级纯白莲蓉馅料 5 种不同品种的莲蓉馅料的风味差异。**方法** 采用电子舌对莲蓉馅料的甜味等主要风味指标进行评价, 结合 GC-MS 技术分析脂肪酸成分, 并通过偏最小二乘法回归分析(partial least squares regression, PLSR)建立电子舌和游离脂肪酸的评价模型, 预测莲蓉馅料的风味。**结果** 5 种莲蓉馅料在甜味和咸味上存在显著差异($P<0.05$), 其中, 绿色食品级纯白莲蓉馅料的甜味强度最高, 手工纯白莲蓉馅料的咸味强度最高。利用 GC-MS 技术共检测出油酸和亚油酸等 9 种游离脂肪酸, 在电子舌和脂肪酸联合评价的 PLSR 回归模型中, 甜味、鲜味、丰富性和油脂味模型的决定系数 R^2 在校正集上分别为: 0.94、0.94、0.95、0.91, 在交叉验证集上分别为: 0.90、0.88、0.91、0.83, 其均方根误差(root mean squared error, RMSE)在校正集上分别为: 0.21、0.14、0.14、0.18, 在交叉验证集上分别为 0.28、0.21、0.20、0.25。与莲蓉馅料单独电子舌或游离脂肪酸风味评价相比, 联合评价表现出更好的预测能力, 特别在油脂味评价上, 交叉验证集的决定系数大幅度提升, 从电子舌评价的 0.15、游离脂肪酸评价的 0.67 增加到 0.83, 决定系数更接近于 1, 均方根误差较小, 显示出更高的拟合度。**结论** 电子舌和脂肪酸联合评价为莲蓉馅料风味的仪器评价研究提供参考数据。

关键词: 莲蓉馅料; 电子舌测定; 游离脂肪酸含量; 风味评价预测模型

Analysis and evaluation of flavor differences in different lotus seed paste fillings by electronic tongue combined with gas chromatography-mass spectrometry

YANG Wen-An¹, ZHANG Nan², LI Sheng-Hua¹, LIANG Zi-Jian², ZHAN Lei¹,
XIE Ya-Man², GAO Xiang-Yang², WANG He-De^{1*}

(1. Guangzhou Restaurant Group Likoufu Food Co., Ltd., Guangzhou 511442, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

基金项目: 企业委托项目(31-C-202-006)

Fund: Supported by the Enterprise Commissioned Projects (31-C-202-006)

*通信作者: 王和德, 高级技师, 主要研究方向为馅料加工工艺。E-mail: 13622768320@139.com

*Corresponding author: WANG He-De, Senior Technician, Guangzhou Restaurant Group Likoufu Food Co., Ltd., No.7565 Xingnan Avenue, Nancun Town, Panyu District, Guangzhou 511442, China. E-mail: 13622768320@139.com

ABSTRACT: Objective To investigate the flavor differences of 5 different varieties of lotus seed paste fillings, including pure white, pure red, master's handmade pure white, low-sugar pure white, and green food-grade pure white by electronic tongue and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) techniques. **Methods** The main flavor attributes, such as sweetness, of the lotus seed paste fillings were evaluated using an electronic tongue. GC-MS analysis was used to analyze the fatty acid composition. Partial least squares regression (PLSR) was employed to establish evaluation models combining electronic tongue and free fatty acids for predicting the flavor of the lotus seed paste fillings. **Results** Significant differences were observed among 5 varieties of lotus seed paste fillings in terms of sweetness and saltiness ($P < 0.05$). Among them, the green food-grade pure white filling showed the highest sweetness intensity, while the master handcrafted pure white filling exhibited the highest saltiness intensity. A total of nine free fatty acids, including oleic acid and linoleic acid, were detected using GC-MS. In the PLSR regression model combining electronic tongue and fatty acids, the determination coefficients (R^2) for sweetness, umami, richness, and oiliness models were 0.94, 0.94, 0.95 and 0.91, respectively, on the calibration set, and 0.90, 0.88, 0.91 and 0.83, respectively, on the cross-validation set. The root mean squared errors (RMSE) were 0.21, 0.14, 0.14 and 0.18 on the calibration set, and 0.28, 0.21, 0.20 and 0.25 on the cross-validation set. Compared to the separate evaluation of lotus seed paste fillings using electronic tongue or free fatty acids, the combined evaluation displayed improved predictive capability, particularly for oiliness evaluation. The determination coefficient on the cross-validation set increased significantly from 0.15 in the electronic tongue evaluation and 0.67 in the evaluation of free fatty acids to 0.83, approaching unity, with a smaller RMSE, indicating a higher degree of fit. **Conclusion** The combined evaluation of electronic tongue and fatty acids provides reference data for the instrumental evaluation of the flavor of lotus fillings.

KEY WORDS: lotus seed paste fillings; electronic tongue measurement; free fatty acid content; flavor evaluation prediction model

0 引言

莲蓉馅料是通过将莲子浸泡、去皮、蒸煮后,加入花生油和糖,经过磨浆和炒制而成^[1]。其口感香甜、细腻爽口,常用作为莲蓉月饼的馅料,深受人们的喜爱。莲子赋予馅料鲜味,花生油提供油脂味,糖增添甜味,这些成分共同形成了馅料风味的丰富性^[2]。不同品种的莲蓉馅料在风味上存在一定差异,评价风味对于莲蓉馅料的加工至关重要。

目前,莲蓉馅料的风味评价主要依赖于化学指标测定和感官评价。如梁梓健等^[3]利用顶空固相微萃取气相色谱串联质谱法(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS/MS)分析了不同莲蓉馅料之间的特征挥发性香气成分的差异。但特征风味化合物并不能完全代表风味评价,感官评价依然是传统风味评价的标准方法。如唐亚楠等^[4]对添加了甜味抑制剂的莲蓉馅料进行感官评价;杜方敏等^[5]构建了感官描述词评价不同品种莲蓉馅料。但感官评价受限于个体差异和环境等因素,某些风味差异评价效果尚不明显^[6]。故需借助仪器分析,探究不同莲蓉馅料的风味差异^[7]。

电子舌可用于食品的定性分析,如酸、甜、苦、甜、鲜等味道的判定,从而比较食品之间的化学差异^[8]。除了 5

种传统味道,食品中的脂肪分解为脂肪酸后,与人体口腔中的脂肪酸触发受体结合,会产生“油脂味”,引起人体味觉反应^[9-10]。在莲蓉馅料制作过程中,加入的花生油以及炒制过程中的脂肪氧化反应会赋予馅料油脂味^[11]。但相比于感官评价,电子舌主要用于评价富含水溶性风味物质的食品,在馅料的脂肪风味上评价效果不明显^[12]。为了弥补电子舌评价的局限性,可利用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术检测引起油脂味的微观组分(脂肪酸)的成分差异分析。

本研究采用 5 种不同品种的莲蓉馅料,借助主成分分析方法,对莲蓉馅料主要风味进行评价,区分品种间差异;同时,通过结合电子舌和 GC-MS 技术共同对莲蓉馅料进行风味评价预测,并建立偏最小二乘法回归分析(partial least squares regression, PLSR)模型快速评价莲蓉馅料风味,为后续建立更完整的莲蓉馅料风味评价体系提供基础理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

5 种莲蓉馅料: 由广州酒家集团利口福食品有限公司提供。共 5 组样品,记为 C1、C2、C3、C4、C5,其中 C1 为纯白莲蓉, C2 为纯红莲蓉, C3 为大师手工纯白莲蓉, C4

为低糖纯白莲蓉, C5 为绿色食品级纯白莲蓉。

甲醇(色谱纯)、石油醚、甲苯(分析纯)、氯化钠(化学纯)(天津市大茂化学试剂有限公司); 正己烷(色谱纯, 国药集团化学试剂有限公司); 浓硫酸(优级纯, 广东广试试剂科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

AL104 万分之一电子天平(上海书培实验设备有限公司); TS-5000Z 电子舌系统(日本 INSENT 公司); 7890B-7000D 气相-质谱联用仪(美国 Agilent 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 电子舌实验

称取 25 g 样品置于洁净的烧杯中, 添加 100 mL 40℃ 左右的纯水, 搅拌混匀, 置于超声波清洗机中超声 10 min, 3000 r/min 离心 5 min, 取上清液用于测试, 每组测试 3 次, 取平均值。

1.3.2 脂肪酸测定实验

参考 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》进行测定。

(1)溶液的配制

5%(体积百分比)浓硫酸/甲醇溶液: 量取 30 mL 浓硫酸缓慢加入到 70 mL 甲醇中, 制得 5%(体积百分比)浓硫酸/甲醇溶液;

5 mg/mL 碳十七脂肪酸甲酯/石油醚(90~120℃)溶液: 称取 5 g 碳十七脂肪酸甲酯溶解于 100 mL 石油醚中, 搅拌溶解, 澄清备用;

0.9%(质量百分比)NaCl/水溶液: 称取 0.9 g 氯化钠溶解于 100 mL 水中, 搅拌溶解, 澄清备用。

(2)样品处理

称取适量样本; 加入内标 100 μL(碳十七脂肪酸甲酯, 5.00 mg/mL), 再加入 5%浓硫酸/甲醇溶液 2 mL, 甲苯 300 μL; 用压盖器将顶空瓶用带聚四氟乙烯垫的铝盖封好, 将上述混合物轻微晃动混匀, 然后于恒温水浴锅中 95℃水浴 1.5 h 提取; 提取结束后取出冷却至室温, 加入 0.9% NaCl 溶液 2 mL, 稍微振荡, 用 1 mL 正己烷萃取, 离心(5000 r/min, 5 min)分层, 取上清于上样瓶中。

(3)色谱条件

气相色谱仪的工作条件: 氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)氢火焰离子化检测器, DB-Fast FAME 色谱柱: 进样口温度 250℃, 分流比 20:1 (V:V), 检测器温度 260℃, 色谱柱初温 80℃, 保持 0.5 min, 以 40℃/min 程序升温至 165℃, 保持 1 min, 以 4℃/min 程序升温至 230℃, 并在此温度下维持 6 min。获得的数据与图谱库美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST) 0.8L 的标准质谱图对照分析, 确定各组分种类, 并采用面积归一化法计算各组分含量。

1.3.3 感官评价实验

根据 GB/T 16291.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则 第 1 部分: 优选评价员》的要求于华南农业大学食品学院中招募感官评价员, 从性别、对食品的态度、健康状况、辨别能力等方面挑选出 10 名评价员, 经过培训后和考核后, 组成感官评定专家小组。而为了使感官评定人员能深入理解感官描述词的类型, 参考 GB/T 10221—2021《感官分析 术语》对描述词添加参照物, 选择蔗糖、谷氨酸钠以及花生油。

1.4 数据处理

本研究的方差分析使用 IBM SPSS Statistics 25 软件; 作图和曲线拟合分析使用 Origin 2019b 64Bit 软件; 建立回归模型使用 The Unscrambler X 10.4 (64-bit)软件。

2 结果与分析

2.1 电子舌对 5 种莲蓉馅料风味的差异分析

基于各样品在电子舌各传感器上的响应值绘制雷达图, 并对各莲蓉馅料主要风味得分进行差异显著性分析。

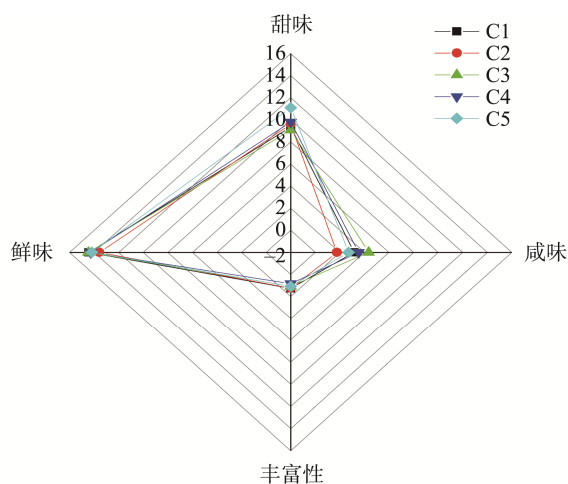


图1 5种莲蓉馅料电子舌有效指标雷达图

Fig.1 Radar chart of effective indicators of 5 kinds of lotus seed filling electronic tongues

莲蓉馅料的不同工艺、原料组成等可能影响电子舌传感技术指标上的差异^[13]。由图 1 可知, 5 种莲蓉馅料的整体风味轮廓相似。在丰富性和鲜味上, 5 组各点较集中, 基本重合, 风味彼此接近。相反, 在甜味和咸味上各点分布较分散。此观察结果与方差分析结果(表 1)相符, 说明莲蓉馅料的风味差异主要体现在甜味和咸味上。5 组莲蓉馅料的甜味强度顺序为: 绿色食品级纯白(C5)>低糖纯白(C4)>纯红(C2)>纯白(C1)>手工纯白(C3), 绿色食品级纯白馅料的甜味得分最高, 可能与选用的莲子品种不同有关; 黄嘉丽等^[14]的研究发现电子舌传感器受羟基存在的影响, 可能导致低糖莲蓉组添加了麦芽糖醇后测得的甜味值较高。

表 1 5 种莲蓉馅料的风味得分
Table 1 Flavor score of 5 kinds of lotus seed filling ingredients

	C1	C2	C3	C4	C5
甜味	9.36±0.04 ^c	9.60±0.16 ^b	9.08±0.11 ^d	9.79±0.27 ^b	11.09±0.04 ^a
咸味	3.15±0.27 ^c	1.75±0.35 ^c	4.33±0.12 ^a	3.52±0.21 ^b	2.70±0.09 ^d
丰富性	1.26±0.03 ^a	1.24±0.06 ^a	1.08±0.04 ^b	0.84±0.07 ^c	1.07±0.04 ^b
鲜味	14.44±0.06 ^a	13.59±0.20 ^c	14.48±0.03 ^a	14.28±0.15 ^b	14.19±0.03 ^b

注：同行不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)，表 2~3 同。

一般认为，在主成分分析中主成分累计贡献率大于 70%，所提取的主成分可以展示出变量大多数信息^[15]。由图 2 可知，PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 51.6%和 23.1%，累计贡献率达 74.7% (>70%)，说明两个 PC 能包含大部分样品的信息，并反映了 5 种莲蓉馅料的整体风味差异。各组在 4 个象限的分布情况显示，除了纯白组和手工纯白组之外，其他组皆分布在不同象限中，说明电子舌能较好地区分不同组别，纯白组和手工纯白组的莲蓉馅料在整体风味上最为相似。

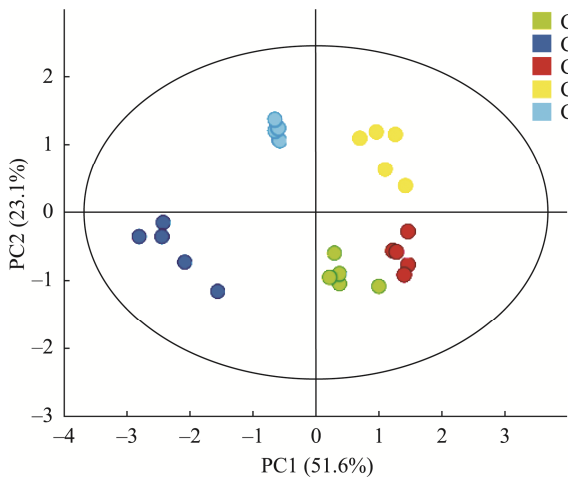


图2 5种莲蓉馅料电子舌主成分得分图

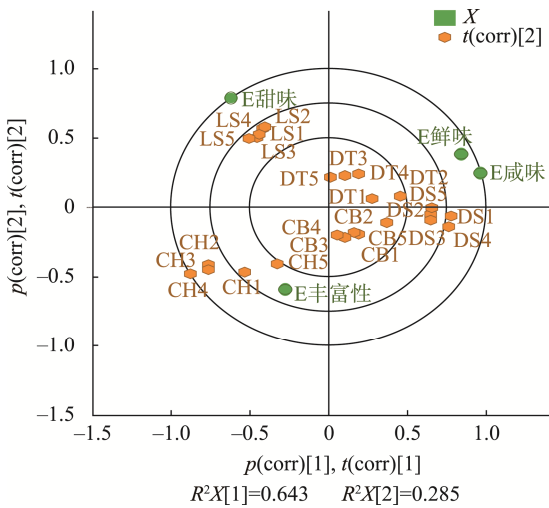
Fig.2 Principal component scores of 5 kinds of lotus seed filling electronic tongues

电子舌各传感器可能会影响组别之间的差异性^[16]。对电子舌结果进行主成分双标分析，进一步比较出 5 种莲蓉馅料与风味之间的相关性^[17]。如图 3 显示，绿色食品级纯白组和纯红组分别与风味指标中“甜味”和“丰富性”具有较高的相关性，这与方差分析结果一致。低糖纯白组与纯白组较接近原点，说明它们在感官特征上区分不明显。大师手工纯白组分布于第一象限和第四象限，与“咸味”和“鲜味”描述词具有较高的相关性。

2.2 5 种莲蓉馅料中游离脂肪酸含量的差异分析

莲蓉馅料在加工过程中添加的花生油经过一定反应

形成脂肪酸，赋予莲蓉馅料油脂味。通过 GC-MS 测定 5 种莲蓉馅料中游离脂肪酸的种类及含量，共测出 9 种游离脂肪酸，具体见表 2。



注：CB为纯白莲蓉；CH为纯红莲蓉；DS为大师手工纯白莲蓉；DT为低糖纯白莲蓉；LS为绿色食品级纯白莲蓉，图4、7同。

图3 5种莲蓉馅料电子舌主成分分析Biplot图

Fig.3 Biplot plot of principal component analysis for electronic tongue of 5 kinds of lotus filling materials

由表 2 可知，5 种莲蓉馅料的棕榈酸、油酸和亚油酸的相对含量较高。油酸和亚油酸占游离脂肪酸总量的 80.64%~81.91%，而饱和脂肪酸仅占 14.75%~16.42%。由此可以推断 5 种莲蓉馅料以不饱和脂肪酸为主。与传统花生油相比，在莲蓉馅料的加工过程中，硬脂酸的含量显著降低^[18]。这可能是因为莲蓉馅的蒸煮过程中，硬脂酸发生分解等反应，导致其含量减少。BESNARD 等^[19]发现，亚油酸能刺激感官上的识别，这可能也是影响莲蓉馅料油脂味的主要物质。方差分析结果表明，5 种莲蓉馅料中，亚油酸的相对含量由高到低依次为：纯白组>绿色食品级纯白组>低糖纯白组>手工纯白组>纯红组。绿色食品级纯白组与纯白组、低糖纯白组之间的差异不显著($P>0.05$)，而其余各组之间存在显著性差异($P<0.05$)。

表 2 5 种莲蓉馅料的游离脂肪酸相对含量(%)
Table 2 Relative content of free fatty acids in 5 kinds of lotus filling (%)

游离脂肪酸	C1	C2	C3	C4	C5
棕榈酸 C16:0	10.42±0.03 ^c	10.46±0.11 ^c	9.94±0.04 ^d	11.19±0.05 ^a	10.55±0.07 ^b
硬脂酸 C18:0	3.50±0.02 ^a	3.45±0.04 ^a	3.27±0.05 ^b	3.46±0.05 ^a	3.51±0.05 ^a
油酸 C18:1n9c	47.67±0.05 ^d	50.64±0.19 ^a	49.36±0.15 ^b	47.27±0.12 ^c	47.94±0.16 ^c
亚油酸 C18:2n6c	34.08±0.04 ^a	31.17±0.24 ^d	32.55±0.80 ^c	33.37±0.07 ^b	33.64±0.12 ^{ab}
α-亚麻酸 C18:3n3	0.24±0.03 ^c	0.29±0.01 ^b	0.55±0.02 ^a	0.26±0.02 ^c	0.25±0.01 ^c
花生酸 C20:0	0.97±0.04 ^b	0.93±0.04 ^{bc}	0.89±0.03 ^c	1.10±0.03 ^a	0.93±0.03 ^{bc}
花生烯酸 C20:1	0.68±0.02 ^b	0.63±0.03 ^c	0.72±0.05 ^{ab}	0.74±0.01 ^a	0.69±0.03 ^b
二十二烷酸 C22:0	1.76±0.02 ^b	1.80±0.11 ^b	1.70±0.09 ^b	2.02±0.07 ^a	1.81±0.07 ^b
二十四烷酸 C24:0	0.67±0.01 ^a	0.62±0.05 ^a	0.65±0.11 ^a	0.67±0.44 ^a	0.65±0.11 ^a

脂肪酸与食品香气呈一定的相关性, 主要是由于脂肪酸及其挥发性衍生物的作用。例如, 正庚烷、壬醛、己醇与油酸呈正相关, 表现出脂肪香和果香; 正己醛、正辛醛与亚油酸呈正相关, 对脂肪味有一定的贡献^[20]。

对莲蓉馅料的游离脂肪酸含量进行主成分分析, 以区分不同品种间的差异, 如图 4。由图 4A 可知, 纯白组和绿色食品级纯白组分布在第三象限, 并且存在部分重叠, 说

明两组的脂肪酸含量非常接近。低糖纯白组位于第二象限, 而纯红组和大师手工纯白组则位于图右侧, 这两组未被 PC1 分离, 但可以通过 PC2 很好地区分。

用 Biplot 图分析 5 种莲蓉馅料与游离脂肪酸相对含量的相关性, 如图 4B。纯红组与油酸有相关性; 大师手工组与油酸、亚麻酸有相关性; 硬脂酸、棕榈酸、花生酸和二十二酸与低糖纯白组有相关性。而纯白组和绿色食品级纯白组之间有一定程度的重合, 说明它们在游离脂肪酸分布上有些相似, 并且分别与花生一烯酸和木蜡酸有相关性。

2.3 5 种莲蓉馅料的感官评价分析

GULER^[21]分析奶酪中的 30 多种游离脂肪酸发现, 游离脂肪酸与食品风味评分呈正相关, 这提示了游离脂肪酸产生的油脂味可作为感官评价指标之一。对 5 种莲蓉馅料从甜味、鲜味、丰富性 3 个方面进行感官评价, 所得的风味差异结果与电子舌和脂肪酸评价进行对比, 如图 5。在油脂味和鲜味方面, 不同组之间的响应值存在明显差异; 而在甜味和丰富性的感官评价上, 部分组之间存在重合。

同时, 结合方差结果(表 3)表明, 在甜味方面, 低糖纯白和纯白组之间没有显著差异($P>0.05$), 但与其他各组之

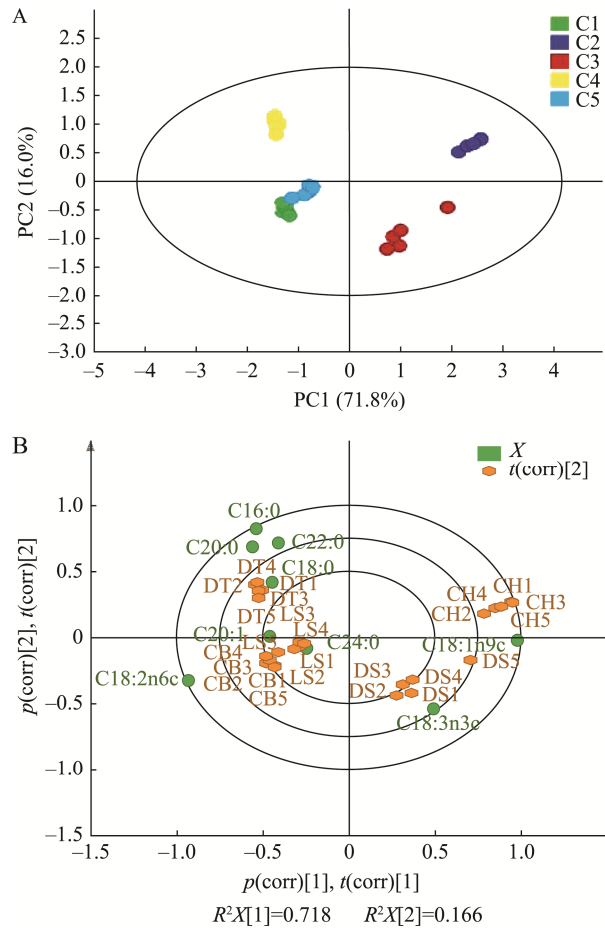


图4 5种莲蓉馅料中游离脂肪酸含量主成分得分图(A)和Biplot图(B)
Fig.4 Principal component scores of free fatty acid content in 5 kinds of lotus seed filling materials (A) and Biplot (B)

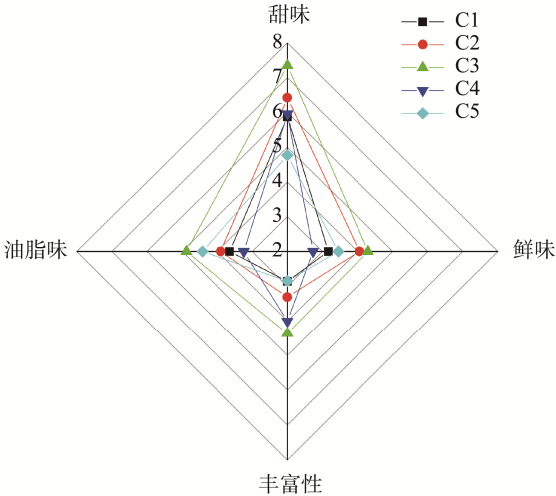


图5 5种莲蓉馅料感官评价有效指标雷达图
Fig.5 Radar chart of effective sensory evaluation indicators for 5 kinds of lotus paste fillings

表 3 5 种莲蓉馅料的感官评价的得分
Table 3 Sensory evaluation scores of 5 kinds of lotus paste fillings

	C1	C2	C3	C4	C5
甜味	5.87±0.09 ^c	6.42±0.09 ^b	7.35±0.26 ^a	5.96±0.2 ^c	4.77±0.27 ^d
鲜味	3.16±0.05 ^d	4.05±0.05 ^b	4.29±0.10 ^a	2.73±0.05 ^e	3.45±0.25 ^c
丰富性	2.86±0.06 ^d	3.31±0.17 ^c	4.37±0.05 ^a	4.01±0.12 ^b	2.85±0.13 ^d
油脂味	3.64±0.10 ^d	3.90±0.08 ^c	4.88±0.09 ^a	3.24±0.22 ^e	4.42±0.10 ^b

间存在显著差异($P<0.05$), 这可能是因为莲蓉馅料中存在鲜味物质, 导致人们对于甜味强度的感知下降, 从而使得低糖纯白组和纯白组在感官评价上的甜味差异不大^[22]。同时, 纯红组的甜度较高, 这可能是因为添加的焦糖成分会增强蔗糖的甜度^[23]。在丰富性方面, 纯白组和绿色食品级纯白组之间的差异不显著($P>0.05$), 但与其他各组之间存在显著性差异($P<0.05$)。

脂肪酸降解形成的一系列物质会发生美拉德反应、脂氧合酶途径等产生风味, 这也是赋予莲蓉油脂味的主要原因^[24]。在油脂味上, 各个组之间均存在显著性差异($P<0.05$)。油脂味的强度从高到低排序为: 手工纯白>绿色食品级纯白>纯红>纯白>低糖纯白。袁彬宏等^[25]发现油酸氧化形成的壬醛是产生脂肪香的主要原因^[2]。另外, 亚油酸降解形成的己醛可以继续参与反应, 生成风味物质^[3]。由于各组存在脂肪酸差异, 也导致了在感官评价上油脂味的差异。

主成分分析能进一步展示各组馅料在感官评价上的差异, 如图 6。

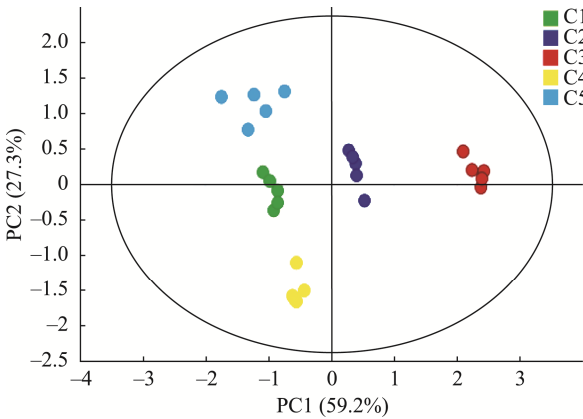


图 6 5 种莲蓉馅料感官评价各风味主成分得分图
Fig.6 Sensory evaluation of 5 kinds of lotus paste fillings and scores of principal components for each flavor

图 6 中 5 种莲蓉馅料各组别数值分布清晰, 且没有相互重叠, 说明它们在整体风味上存在一定差异性。特别是手工纯白组与其他各组之间的距离较远, 说明风味差异较大。纯红组均与其他各组明显区分开, 表明它在感官评价上的风味最为特别, 这可能与制作纯红莲蓉馅料时添加的

焦糖形成的特殊风味有关^[5]。对各组别进行主成分双标分析, 如图 7。

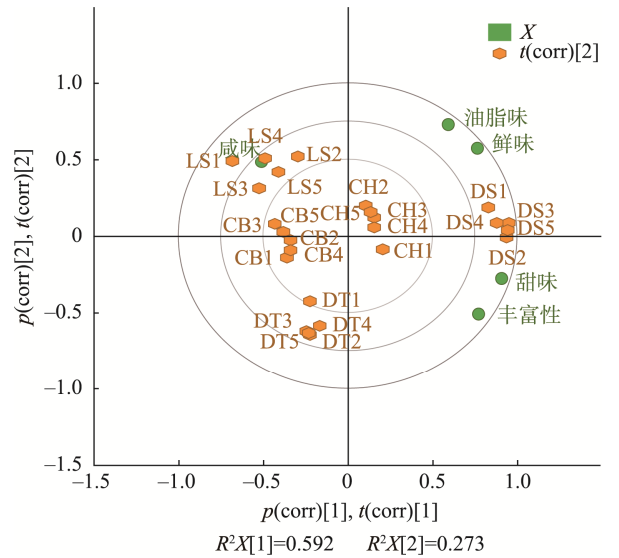


图 7 5 种莲蓉馅料感官评价各风味主成分分析Biplot图
Fig.7 Sensory evaluation of 5 kinds of lotus paste fillings, principal component analysis of each flavor, Biplot plot

由图 7 可得, 与方差结果一致, 大师手工纯白组与甜味接近, 表现出较高的甜味特征, 与其他各组明显区分开, 说明它具有独特的感官特征, 在感官上有明显差异。绿色食品级纯白组集中分布于第二象限, 与纯白组别在分布上较为接近, 两组之间的分布存在一定相似性, 可能共同具有某些感官特征, 例如咸味。纯白和纯红组别分布于原点附近, 感官特征并不明显, 在整体风味上没有太大的差异。

2.4 电子舌风味评价和脂肪酸含量与感官评价相关性分析

2.4.1 电子舌和感官评价在主成分分析上的差异分析

电子舌评价莲蓉馅料风味机制是模拟人体口腔感受器, 通过响应信号进行综合评分^[26]。电子舌的主成分分析图显示各组馅料在不同象限分布, 纯白和手工组除外。感官评价主成分分析图的区分效果不及电子舌明显。纯白、纯红和手工纯白组在 PC2 上分布相似, 在象限间缺乏明显的分布规律。

感官评价存在一些局限性, 包括人体的感官存在个体、敏感性和适应性方面存在差异。此外, 个体在评价样品的“感觉阈值”也存在差异, 例如, 在甜味方面, 各组馅料在感官评价上并不是完全显著差异, 这是由于人的舌头对甜味的感知存在阈值, 各组之间的甜味差异尚无法完全被舌头感知^[27]。同时, 评价环境和个体状态也可能使感官评价的敏感度下降^[28-29]。这是电子舌评价比感官评价更能区分各组风味差异的原因。

在电子舌的主成分分析图中, 纯白和手工纯白组同时分布在第四象限, 但在感官评价的主成分分析图中, 两组在 PC1 方向上明显区分。这可能与人体存在的感觉体系有关, 舌头中分泌的唾液可稀释和分解样品, 重新赋予味道, 并将信号传递到大脑中。这也是电子舌所存在的限制的原因之一^[8]。

2.4.2 电子舌、脂肪酸对于风味评价的预测

PLSR 是一种与主成分回归有一定关系的统计方法, 通过将预测变量和可观察变量投影到一个新的空间, 得到一个新的线性回归模型^[30]。以电子舌、游离脂肪酸的各项数据作为自变量数据集(X), 感官评价数据矩阵作为因变量数据集(Y), 建立回归方程, 其回归方程如下:

$$Y=A_0+A_1X_1+A_2X_2+A_3X_3+A_4X_4+A_5X_5+A_6X_6+A_7X_7+A_8X_8+A_9X_9+A_{10}X_{10}+A_{11}X_{11}+A_{12}X_{12}+A_{13}X_{13}$$

式中: Y 为感官属性的回归值; A₀ 为常数项; A₁ 至 A₁₃ 为回归系数(如表 4); X₁ 至 X₁₃ 为电子舌数据和游离脂肪酸数据的指标(电子舌-鲜味、电子舌-丰富性、电子舌-咸味、电子舌-甜味、C16:0、C18:0、C18:1n9c、C18:2n6c、C18:3n3、C20:0、C20:1、C22:0、C24:0)。电子舌评价指标为 X₁ 至 X₄, 游离脂肪酸评价指标为 X₅ 至 X₁₃, 电子舌-游离脂肪酸联合评价指标为 X₁ 至 X₁₃。

在建立 PLSR 预测模型时, 选择的最适主成分数为 3^[31], 建立回归模型。回归模型表明, 脂肪酸评价中的油酸和亚麻酸与感官属性呈正相关, 而电子舌评价中的丰富性与 4 种感官属性呈负相关。此外, 感官评价中的甜味与电子舌评价的鲜味、甜味及脂肪酸评价中的亚油酸呈负相关, 与咸味呈正相关。鲜味与电子舌评价的甜味呈正相关, 与鲜味和亚油酸呈负相关。除了电子舌评价中的鲜味、丰富性和甜味, 脂肪酸评价中的硬脂酸和亚油酸与丰富性呈负相关, 其他指标与之呈正相关。在油脂味方面, 与之呈正相关的有电子舌评价的鲜味、咸味和甜味。

将样品分为校正集和交叉验证集, 校正集验证系数的准确性, 交叉验证集进一步优化回归模型, 得到具有最优参数的回归模型^[32]。电子舌、游离脂肪酸以及电子舌-游离脂肪酸的联合评价的预测效果如表 5。表 5 中联合评价的电子舌和游离脂肪酸对 4 种感官属性的预测表现良好。校正集中的决定系数 R² 分别为: 0.94、0.94、0.95、0.91, 交叉验证集中的决定系数 R² 分别为: 0.90、0.88、0.91、0.83, 均方根误差(root mean squared error, RMSE)在校正集中分别为: 0.21、0.14、0.14、0.18, 在交叉验证集中分别为: 0.28、0.21、0.20、0.25, 说明该模型具有较高的准确度。

与仅使用电子舌或游离脂肪酸评价相比, 电子舌和游离脂肪酸联合评价在预测莲蓉馅料的油脂味上取得了显著的改进。联合评价的校正决定系数从电子舌评价上的 0.40 增加到 0.91, 交叉验证决定系数从 0.15 增加到 0.83。这表明联合评价方法具有更好的拟合效果和更接近于 1 的 R² 值, RMSE 也相对较小, 能更好地评价莲蓉馅料风味。

表 4 采用 PLSR 模型建立的 4 种感官属性与各回归系数关系
Table 4 Relationship between 4 kinds of sensory attributes and various regression coefficients established using PLSR model

感官属性	回归系数													
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
甜味	18.53	-0.14	-0.07	0.10	-0.53	-0.07	-2.34	0.12	-0.15	1.36	1.07	0.47	0.33	0.31
鲜味	9.55	-0.13	-0.06	0.00	0.08	-0.29	-0.72	0.12	-0.08	1.07	-1.71	-0.99	-0.21	-0.24
丰富性	8.58	-0.08	-1.08	0.13	-0.19	0.08	-1.72	0.07	-0.11	1.38	1.03	1.67	0.69	0.03
油脂味	6.09	0.13	-0.27	0.04	0.35	-0.42	-0.62	0.04	0.02	1.29	-2.43	0.17	-0.66	-0.61

表 5 基于 PLSR 模型预测 4 种感官评价效果
Table 5 Prediction of 4 kinds of sensory evaluation effects based on PLSR model

感官属性	自变量数据集	校正集		交叉验证集	
		RMSE	R ²	RMSE	R ²
甜味	电子舌	0.35	0.83	0.41	0.78
	游离脂肪酸	0.40	0.78	0.52	0.67
	电子舌+游离脂肪酸	0.21	0.94	0.28	0.90
鲜味	电子舌	0.31	0.72	0.39	0.60
	游离脂肪酸	0.14	0.94	0.19	0.90
	电子舌+游离脂肪酸	0.14	0.94	0.21	0.88
丰富性	电子舌	0.21	0.89	0.27	0.83
	游离脂肪酸	0.20	0.90	0.28	0.81
	电子舌+游离脂肪酸	0.14	0.95	0.20	0.91
油脂味	电子舌	0.46	0.40	0.57	0.15
	游离脂肪酸	0.27	0.79	0.35	0.67
	电子舌+游离脂肪酸	0.18	0.91	0.25	0.83

建立电子舌和游离脂肪酸联合预测模型,用于预测 4 种感官属性评价。通过校正集和交叉验证集进行预测,结果如图 8。图 8 中预测值与实际值在 4 种感官属性上有较

高重合度,数据点均匀分布于回归线两侧。这表明电子舌和游离脂肪酸联合评价与感官评价在 4 种感官属性上具有一定匹配度。

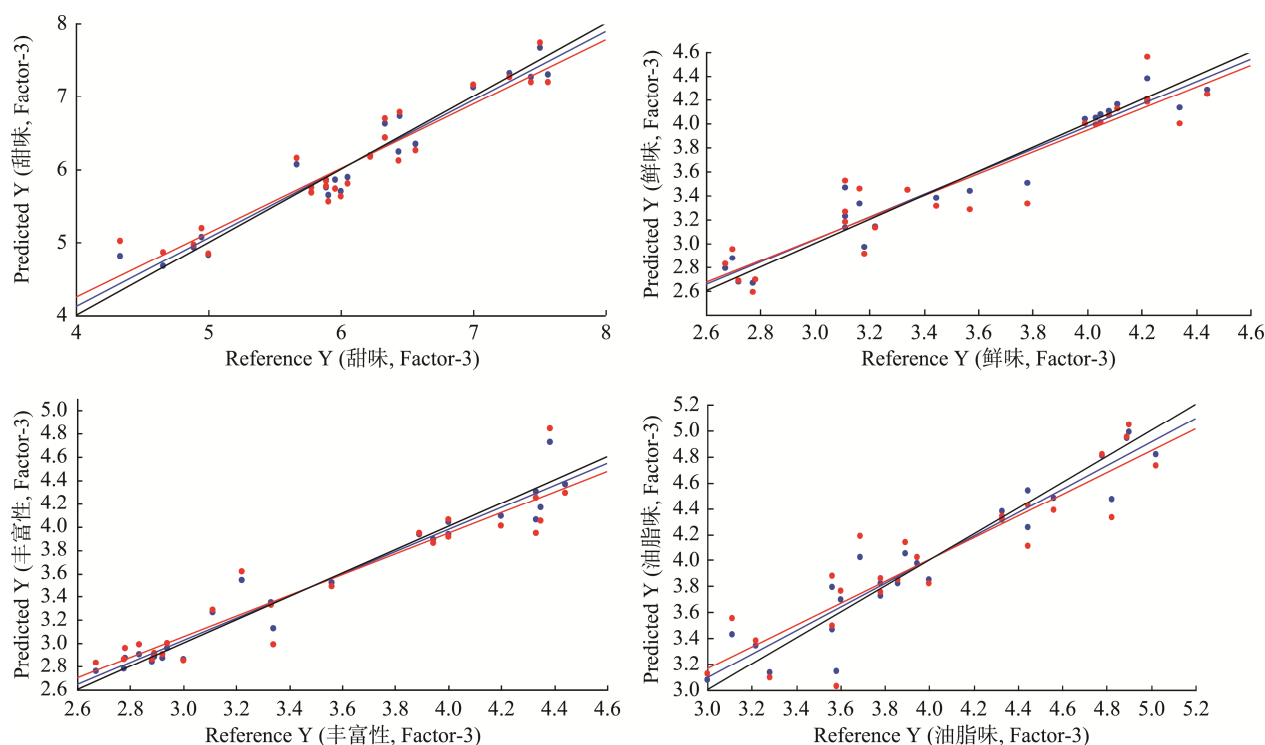


图8 基于PLSR模型预测4种感官评价效果图

Fig.8 Prediction of 4 kinds of sensory evaluation effects based on PLSR model

3 讨论与结论

本研究采用电子舌评价结合 GC-MS 测定脂肪酸含量的方法,比较了纯白、纯红、大师手工纯白、低糖纯白和绿色食品级纯白莲蓉馅料的风味差异。感官评价方法受限于人体主观判断,采用电子舌评价能区分出 5 种莲蓉馅料的风味差异,尤其在甜味差异评价方面效果好,但在纯白莲蓉馅料和手工纯白莲蓉馅料之间的风味区分度较低,在油性食品风味评价方面尚存缺陷。脂肪酸的油酸和亚油酸成分是导致莲蓉馅料的油脂味差异的主要因素,结合 GC-MS 测定脂肪酸差异分析可进一步完善电子舌评价的风味区分效果。建立了莲蓉馅料甜味、鲜味、丰富性和油脂味的电子舌和脂肪酸含量评价的 PLSR 模型,此仪器联合评价模型具有较强的预测能力,决定系数较高, RMSE 较小,特别在油脂味方面,交叉验证集和校正集中的决定系数高达 0.83、0.91,表现出对莲蓉馅料的油脂味评价效果更为优越。

采用的电子舌和脂肪酸联合评价方法能针对莲蓉馅料的甜味和油脂味属性更全面地评价其风味特征,发挥电子舌在甜味差异评价的优势, GC-MS 脂肪酸含量的测定弥补了电子舌在油性食品评价上的不足,电子舌结合 GC-MS 脂肪酸含量测定的评价方法为莲蓉馅料风味的仪

器评价研究提供了参考数据。同时,通过仪器分析风味,可以较为准确捕捉到莲蓉馅料中微量成分的变化和风味特征,为新产品研发和创新提供科学依据和指导,对馅料的风味进行快速评价,深入了解馅料的风味特性,根据消费者需求调整配方,实现产品差异化竞争。

参考文献

- [1] 吴锦源, 梁梓健, 李生花, 等. 5 种功能性甜味剂对莲蓉馅料品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 62–70.
WU JY, LIANG ZJ, LI SH, *et al.* The effects of five functional sweeteners on the quality of lotus filling [J]. Food Sci, 2023, 44(8): 62–70.
- [2] YANG Y, LIU R, HAN Y, *et al.* Critical taste substances and regulatory pathways of fresh lotus seed pulps at different ripeness stages [J]. Postharvest Biol Technol, 2023, 205: 112522.
- [3] 梁梓健, 方嘉沁, 吴锦源, 等. HS-SPME-GC-MS/MS 联用分析莲蓉馅料的特征挥发性香气成分[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 301–308, 204.
LIANG ZJ, FANG JQ, WU JY, *et al.* HS-SPME-GC-MS/MS analysis of characteristic volatile aroma components in lotus filling [J]. Mod Food Sci Technol, 2022, 38(7): 301–308, 204.
- [4] 唐亚楠, 郑建仙. 甜味抑制在莲蓉馅料中的应用[J]. 食品与机械, 2011, 27(4): 142–145.
TANG YN, ZHENG JX. The application of sweetness inhibitors in lotus filling [J]. Food Mach, 2011, 27(4): 142–145.
- [5] 杜方敏, 吴锦源, 李生花, 等. 广式月饼莲蓉馅料感官评价描述词的构

- 建[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(5): 122–128.
- DU FM, WU JY, LI SH, *et al.* The construction of sensory evaluation descriptors for Cantonese mooncake lotus filling [J]. *China Food Addit*, 2022, 33(5): 122–128.
- [6] JIANG S, ZHU Y, PENG J, *et al.* Characterization of stewed beef by sensory evaluation and multiple intelligent sensory technologies combined with chemometrics methods [J]. *Food Chem*, 2023, 408: 135193.
- [7] ANDREWES P, BULLOCK S, TURNBULL R, *et al.* Chemical instrumental analysis versus human evaluation to measure sensory properties of dairy products: What is fit for purpose? [J]. *Int Dairy J*, 2021, 121: 105098.
- [8] 王兴亚, 庞广昌, 李阳. 电子舌与真实味觉评价的差异性研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(1): 213–216, 20.
- WANG XY, PANG GC, LI Y. Research progress on the differences between electronic tongue and real taste evaluation [J]. *Food Mach*, 2016, 32(1): 213–216, 20.
- [9] DIPATRIZIO NV. Is fat taste ready for primetime? [J]. *Physiol Behav*, 2014, 136: 145–154.
- [10] GRAHAM CAM, PILIC L, KING A, *et al.* Genetic differences in fat taste sensitivity and dietary intake in a UK female cohort [J]. *Food Qual Prefer*, 2021, 92: 104202.
- [11] 刘玉兰, 孙国昊, 刘配莲, 等. 浓香花生油和精炼花生油挥发性成分及感官风味差异的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(11): 122–128.
- LIU YL, SUN GH, LIU PL, *et al.* A study on the differences in volatile components and sensory flavors between strong flavored peanut oil and refined peanut oil [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2023, 38 (11): 122–128.
- [12] SIPOS L, GERE A, SZÖLLÖSI D, *et al.* Sensory evaluation and electronic tongue for sensing flavored mineral water taste attributes [J]. *J Food Sci*, 2013, 78(10): S1602–S1608.
- [13] 苏智敏, 黄小平, 刘飞, 等. 电子舌技术在食用盐模糊感官评价中的应用[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 53–56.
- SU ZM, HUANG XP, LIU F, *et al.* The application of electronic tongue technology in the fuzzy sensory evaluation of edible salt [J]. *Food Mach*, 2020, 36(8): 53–56.
- [14] 黄嘉丽, 黄宝华, 左珊珊, 等. 多种甜味剂的电子舌味觉评价[J]. *食品科学*, 2020, 41(20): 227–233.
- HUANG JL, HUANG BH, ZUO SS, *et al.* Electronic tongue taste evaluation of multiple sweeteners [J]. *Food Sci*, 2020, 41(20): 227–233.
- [15] 王丽, 句荣辉, 杨洋, 等. 马铃薯品质特性的相关性及其主成分分析[J]. *食品工业*, 2023, 44(12): 307–312.
- WANG L, JU RH, YANG Y, *et al.* The correlation and principal component analysis of potato quality characteristics [J]. *Food Ind*, 2023, 44(12): 307–312.
- [16] XIAO Z, WU M, NIU Y, *et al.* Contribution of chicken base addition to aroma characteristics of Maillard reaction products based on gas chromatography-mass spectrometry, electronic nose, and statistical analysis [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2015, 24(2): 411–449.
- [17] ZHANG X, SU M, ZHOU H, *et al.* Effect of 1-methylcyclopropene on flat peach fruit quality based on electronic senses, LC-MS, and HS-SPME-GC-MS during shelf storage [J]. *LWT*, 2023, 173: 114388.
- [18] XIE Y, JIANG S, LI M, *et al.* Evaluation on the formation of lipid free radicals in the oxidation process of peanut oil [J]. *LWT*, 2019, 104: 24–29.
- [19] BESNARD P, PASSILLY-DEGRACE P, KHAN NA. Taste of fat: A sixth taste modality? [J]. *Physiol Rev*, 2016, 96(1): 151–176.
- [20] MURLEY T, KELLY B, ADHIKARI J, *et al.* A comparison of fatty acid and sensory profiles of raw and roasted pecan cultivars [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(9): 2665–2672.
- [21] GULER Z. Quantification of free fatty acids and flavor characteristics of Kasar cheeses [J]. *J Food Lipids*, 2005, 12(3): 209–221.
- [22] 胡嘉杰, 康正雄, 李洪亮. 甜味感受及其影响因素的研究进展[J]. *饮料工业*, 2017, 20(1): 57–60.
- HU JJ, KANG ZX, LI HL. Research progress on sweet taste perception and its influencing factors [J]. *Beverage Ind*, 2017, 20(1): 57–60.
- [23] PARAVISINI L, MORETTON C, GOUTTEFANGEAS C, *et al.* Caramel flavour perception: Impact of the non-volatile compounds on sensory properties and *in-vitro* aroma release [J]. *Food Res Int*, 2017, 100: 209–215.
- [24] 袁彬宏, 陈亚淑, 周琦, 等. 亚麻籽油挥发性风味物质研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(19): 290–298.
- YUAN BH, CHEN YS, ZHOU Q, *et al.* Research progress on volatile flavor compounds in flaxseed oil [J]. *Food Sci*, 2023, 44 (19): 290–298.
- [25] 袁彬宏, 贾懿敏, 杨旖旎, 等. 不同品种浓香亚麻籽油的呈香特征解析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(8): 90–100.
- YUAN BH, JIA YM, YANG YN, *et al.* Analysis of aroma characteristics of different varieties of strong aroma flaxseed oil [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(8): 90–100.
- [26] 彭星星, 李晋, 高海军, 等. 电子舌分析技术鉴别核桃油中掺入菜籽油的研究[J]. *食品工业*, 2023, 44(12): 300–303.
- PENG XX, LI J, GAO HJ, *et al.* A study on the identification of rapeseed oil mixed with walnut oil using electronic tongue analysis technology [J]. *Food Ind*, 2023, 44 (12): 300–303.
- [27] WU J, CHEN X, CHEN B, *et al.* Collaborative analysis combining headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) and intelligent (electronic) sensory systems to evaluate differences in the flavour of cultured pufferfish [J]. *Flavour Fragr J*, 2021, 36(2): 182–189.
- [28] LIU D, ARCHER N, DUESING K, *et al.* Mechanism of fat taste perception: Association with diet and obesity [J]. *Prog Lipid Res*, 2016, 63: 41–49.
- [29] 蒋丽施. 电子舌在食品感官品评中的应用[J]. *肉类研究*, 2011, 25(2): 49–52.
- JIANG LS. The application of electronic tongue in food sensory evaluation [J]. *Meat Res*, 2011, 25(2): 49–52.
- [30] BOUBCHIR M, AOURAG H. Materials genome project: The application of principal component analysis to the formability of perovskites and inverse perovskites [J]. *Comp Cond Matter*, 2020, 24: e00495.
- [31] 王孔檀, 麦力文, 王定美, 等. 基于 PCA-HCA 联合 PLS 回归模型的蚯蚓粪肥品质等级划分[J]. *中国土壤与肥料*: 1–18. [2024-05-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.s.20240316.1436.002.html>
- WANG KT, MAI LW, WANG DM, *et al.* Classifying the quality of vermicompost using principal component clustering (PCA-HCA) combined with PLS regression model [J]. *Soil Fertil Sci Chin*, 1–18. [2024-05-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.s.20240316.1436.002.html>
- [32] 田霄艳. 大豆蛋白水解物苦味肽的鉴定及掩蔽研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- TIAN XY. Identification and masking of bitter peptides from soy protein hydrolysates [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Technology, 2021.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介



杨文安, 高级技师, 主要研究方向为月饼加工工艺。

E-mail: lkfkjxm@126.com



王和德, 高级技师, 主要研究方向为馅料加工工艺。

E-mail: 13622768320@139.com